

燃料蒸気予混合気中の液滴列を燃え広がる火炎と液滴の熱的干渉微小重力実験

日大生産工(院) ○高橋 弘 日大生産工 野村 浩司
 JAXA 菊池 政雄

1 緒言

噴霧燃焼は、ディーゼル機関を代表として幅広く用いられている燃焼方式である。噴霧燃焼は種々の現象が互いに影響しあいながら同時進行する複雑な現象である。ゆえに燃焼機構の完全な解明にはいまだ至っておらず、燃焼機構の詳細な把握のため種々のアプローチが試みられている。燃焼機構解明の手法として、自然対流を取り除く目的で微小重力環境を利用した研究が進められている。噴霧を単純モデル化した1次元燃料液滴列を用いた実験^{[1]-[5]}は、群燃焼や噴霧燃焼の詳細な機構を把握するための手法として有用である。燃料の予蒸発が火炎燃え広がり及びぼす影響を調べるため、菅沼らは燃料蒸気-空気予混合気中に置かれた燃料液滴列を対象とした燃え広がり実験を行い、火炎燃え広がり速度の気体当量比依存性について明らかにした^[1]。菊池らは燃料液滴列の燃え広がりについての数値シミュレーション^[6]を行ってきた。数値シミュレーションの結果と実験結果を相互に検証し、シミュレーションコードの高精度化を試みている。火炎燃え広がりの際の熱的干渉機構の解明を目的とし、著者らは火炎燃え広がりの際の熱的干渉機構の解明を目的とし、液滴列中に配置された液滴を拡大撮影して燃え広がる火炎と列中の液滴の熱的干渉について液滴直径履歴から考察した^[2]。しかしながら、液滴列の燃え広がり火炎観測の時間分解能が低く、観察対象も1液滴であったため、詳細な考察が困難であった。本報告では、拡大観察対象を2から4液滴として液滴直径履歴計測を行い、液滴とともに写っている懸垂線の発光を調べることで燃え広がり火炎位置推定を高時間分解能で行うことにした。液滴直径履歴および火炎の位置履歴より、周囲予混合気の気体当量比が燃え広がる火炎と液滴の熱的な干渉に及ぼす影響について考察する。

2 実験装置および測定方法

本研究で対象とする実験モデルは、燃料蒸気-空気混合気中の格子状三次元液滴マトリックスから一部を切り出した液滴列である。等間隔に10個の液滴を

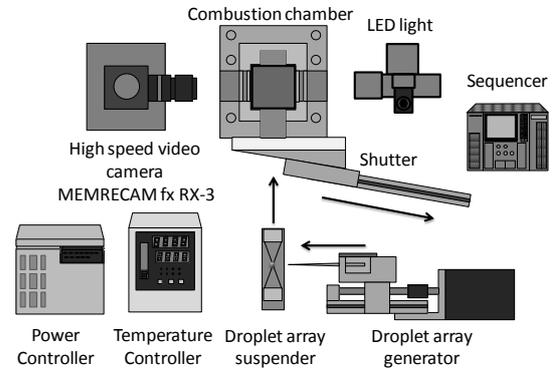


Fig.1 Experimental apparatus.

直線状に配置し、第1液滴を点火させることで火炎を燃え広がらせる。図1に実験装置の概略を示す。装置は、燃焼容器、液滴列生成装置、液滴列支持装置、点火装置、制御装置および高速度ビデオカメラを含む撮影装置より構成される。燃焼容器は一辺が l_{wh} の正方断面であり、液滴列は、正方断面の中心に配置した。列方向の実験空間長さは116 mmで固定した。

燃焼容器の一端は閉端とし、もう一端は開端とした。第10液滴は燃焼容器閉端より液滴間隔の1/2離れた位置に配置した。燃焼容器壁面には、火炎の熱損失を低減させるため、セラミックス(熱伝導率: 1.67 W/m・K)を用いた。床面には、液滴列挿入用のスリットが設けられており、燃焼容器を燃料蒸気で満たしている間は、エアアクチュエータで駆動されるシャッタによって閉じられている。容器側面には耐熱ガラス製の観察窓を設置し、燃焼容器内の飽和蒸気が凝縮することを防ぐために二重窓とした。液滴列生成装置は、引き伸ばしたガラス針を液滴の個数分備えている^[3]。実験装置の設定、観察条件を表1に記す。複数の実験データが得られている条件についてはそれらの平均値を実験結果として用いた。燃料パックより、ポリテトラフルオロエチレンチューブ、サーボモータにより駆動するマイクロアナログポンプまたはマイクロシリンジポンプを介して燃料溜め部およびガラス針に燃料が送られる。ガラス針は液滴間隔に合わせて10本並列に配置した。燃料吐出量を制御することにより、設定値の直径の液滴

Table 1 Experimental parameters.

| $l_{wh} \times l_d$, mm x mm | 25 x 116 | | | |
|-------------------------------|---|---|-------|--|
| S , mm | 1.6±10% | 2.4±10% | 3±10% | 10.2±10% |
| d_{0n} , mm | 0.8±10% (3 rd ~9 th droplets), about 0.8 (other droplets) | | | |
| ϕ_g | 0~0.7 | 0~0.5 | 0~0.7 | 0.2~0.7 |
| Obaervation | 4 th ~7 th droplets | 5 th ~7 th droplets | | 5 th , 6 th droplets |
| Obtained data | 2 | | | 1 |
| Frame rate, fps | 500 | | | 250 |
| Resolution, pix | 1280 x 1024 | | | |
| Gravity | Normal gravity | Microgravity (Nihon University) | | Microgravity (MGLAB) |

を生成した。液滴列支持部はセラミックス製のフレームであり、のSiCファイバ（直径14 μm ）がX字型に等間隔に配置されている。液滴はX字型ファイバの交点に懸垂される。X字型ファイバの配置間隔を変更することで、液滴間隔を変更した。液滴中心間距離は後述の解析ソフトで解析し、設定液滴間隔の $\pm 10\%$ 以内になるように調整した。第一液滴の点火は電熱線で行い、電熱線には鉄クロム線（直径0.35 mm）を使用した。制御装置には、シーケンサを使用した。シーケンサにより、電熱線への通電時間、支持部移動モータの制御を行った。また、液滴生成装置、シャッターおよび高速度ビデオカメラへのトリガ信号出力を行った。燃焼容器温度制御装置は、前述の温度調節器、アナログ制御方式単相電力調節器、測温抵抗体（Pt100）、および燃焼容器に内蔵した12本のシーヒータで構成される。測温抵抗体で実験空間中央部の混合気温度を計測し、温度調節器によりPIDアナログ制御を行い、単相電力調節器を介してシーヒータを制御することで、燃焼容器内空間を一定温度に保っている。液滴の拡大撮影には、LED光源によるバックリット法を用い、高速度ビデオカメラで記録した。拡大された液滴の直径計測には、鈴木らの画像解析方法^[7]を用いた。液滴生成の監視には、CCDカメラを用いた。観察対象の液滴（第 n 番目）の初期液滴直径 d_{0n} は、燃焼容器挿入直後の液滴が火炎により熱的影響を受けていない0.3 s間の平均直径とした。過去の実験結果および菊池らの数値シミュレーション結果と比較を行うため、燃料には正デカン（ $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ ）を使用した。微小重力実験は、日本大学生産工学部の小型落下塔（二重箱方式、微小重力時間約1 s）および日本無重量総合研究所の大型落下塔（真空中落下方式、微小重力時間約4.5 s）を利用した。火炎燃え広がりに及ぼす自然対流の影響が少ない無次元液滴間隔2.0の条件のみ、通常重力環境で実験を行った。

3. 実験方法

雰囲気気体である予混合気は、均一に加熱した燃焼容器内部に液体燃料を注入することで生成した。

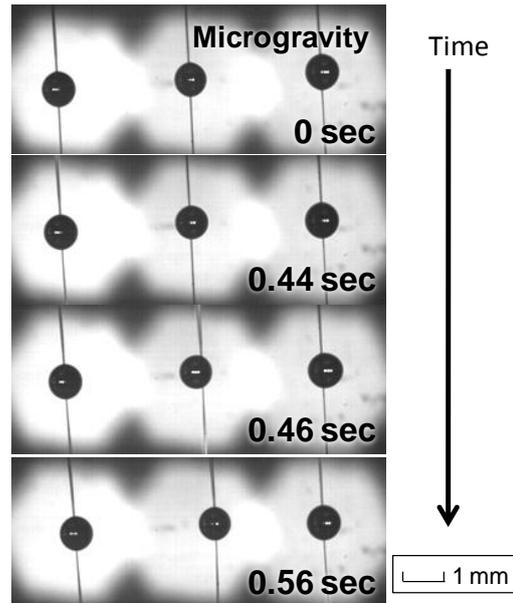


Fig.2 Sequential backlit images of droplets.
 $d_{0, (4-6)} = 0.8 \text{ mm}$, $\phi_g = 0.4$, $S/d_0 = 3.75$

燃料蒸気-空気予混合気の気体当量比は、燃焼容器内の蒸気が飽和蒸気であることとダルトンの法則が成り立っていることを仮定し、燃料の飽和蒸気圧から計算した。気体当量比の調整後、燃焼容器下方で燃料液滴列を生成した。その後直ちにシャッターを開け、燃料液滴列を燃焼容器内に挿入した。挿入完了後カプセルを落下させ、微小重力センサにより微小重力を検知した時点で点火トリガ信号および高速度カメラ撮影開始トリガ信号の送信を行った。

4. 実験結果および考察

気体当量比 ϕ_g を0から0.7に変化させ、燃料液滴列燃え広がり実験（表1参照）を行った。図2に拡大撮影により得られた火炎燃え広がり中の液滴画像を示す。画像で火炎は確認できないが、懸垂線が発光している様子が見取れる。懸垂線発光から液滴が点火したと考えられる時刻を得るため、懸垂線の輝度を計測した。高速度カメラで得られたデジタル画像データより、懸垂線を検出するために、画像の青色輝度から液滴付近の最大輝度と最小輝度を抽出

した。最大輝度と最小輝度を1:1に内分する点を閾値とし、閾値以下のピクセルを懸垂線として検出した。バックライトの当たっていない範囲および液滴の部分は除外した。懸垂線と認識されたピクセルの赤色に関する平均輝度時間履歴を火炎燃え広がり連続画像から求めた。結果を図3に示す。縦軸は懸垂線の赤色に関する平均輝度、横軸は微小重力検知時刻を0とした経過時間である。拡大撮影を行った各液滴の点火時刻は、目視で懸垂線の発光が確認された時刻の前後0.02 s 間で輝度が最も大きく変化した時刻とした。液滴の直径2乗履歴を図3に示す。縦軸は初期液滴直径 d_{0n} で正規化した液滴直径 d_n の2乗、横軸は微小重力検知時刻を0とした経過時間である。破線で各液滴の膨張開始時刻、細線で二乗履歴の点火前、太線で点火後を示した。得られた直径2乗履歴より、対象とする液滴が燃え広がり火炎から熱的影響を受けて熱膨張を開始した時刻と点火した時刻を求め、それらの時刻の差を点火誘導時間 τ_i として求めた。液滴は、燃焼室に挿入されると温度が上昇するため、緩やかに膨張する。そこで、液滴直径の2乗履歴において、微小重力検知から0.1 s までの期間の傾きを雰囲気温度変化による膨張率とし、その期間の傾きの最大値を最初に超えた時刻を膨張開始時刻とした。傾きは、液滴直径の2乗履歴の0.02 s ごとの微分値とした。得られた点火誘導時間を図5に示す。縦軸は初期液滴直径の2乗で正規化した点火誘導時間、横軸は気体当量比である。いずれの液滴間隔においても、気体当量比の増大に伴って点火誘導時間が減少していることがわかる。液滴間隔が最も広い無次元液滴間隔が12.75においてその減少が顕著である。また、無次元液滴間隔が2.0から3.75の範囲では、無次元液滴間隔の増大に伴って点火誘導時間が若干減少する傾向はあるが、大きな変化は観られないことがわかった。梅村らにより定義された燃え広がりモードの分類^[5]に従えば、火炎の挙動は過去の火炎燃え広がり実験^[4]から、気体当量比にほぼ影響されることなく、無次元液滴間隔3.75付近でモード1から2に遷移し、無次元液滴間隔6.25でモード2から3に遷移することがわかっている。燃え広がり速度が時間的にほぼ一定であるモード1の燃え広がりにおいては、点火誘導時間は液滴間隔にあまり影響されず、気体当量比の増大に伴ってほぼ同程度減少することがわかった。燃え広がり誘導時間 τ_i は、対象の液滴の点火時刻から1つ前の液滴の点火時刻を引いて求め、対象の液滴の1つ前の液滴の初期直径の2乗で正規化した。正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比を、気体当量比の関数として図6に示す。燃え広がり誘導時間と点火誘導時間の比は、対象液滴の何個前の液滴が点火した時点から対象液滴の加熱が開始されているかの指標である。無次元

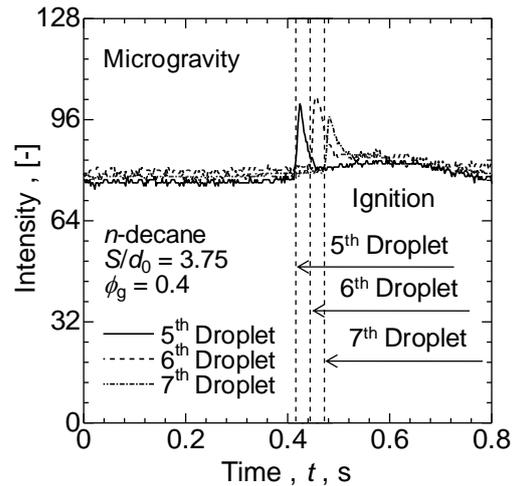


Fig.3 Histories of Droplet Suspender Intensity.

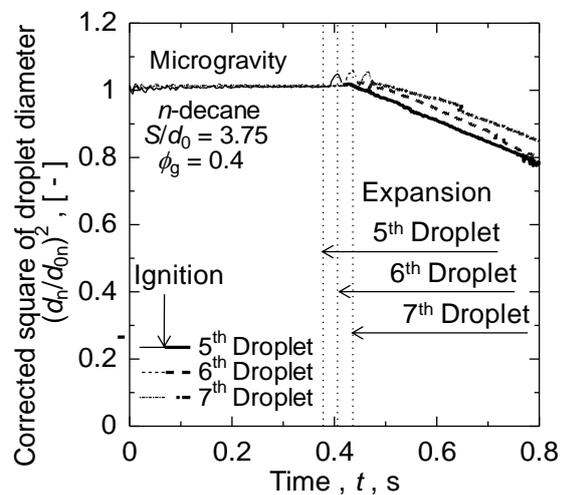


Fig.4 Histories of squared nondimensional droplet diameter.

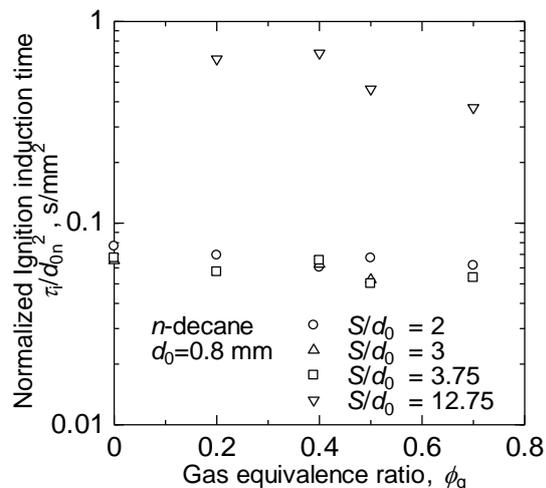


Fig.5 Relationship between normalized ignition induction time and gas equivalence.

液滴間隔が2, 3および3.75の場合、隣接する未燃液滴が点火する以前から液滴は火炎の熱的影響を受けていることがわかる。また、気体当量比の増大に伴ってさらに前の液滴の火炎から熱的影響を受けるようになることがわかる。一方、無次元液滴間隔が12.75の場合、ほぼ隣接する液滴の点火時刻から熱的影響を受け、気体当量比の増大に伴って、隣接する液滴の点火から遅れて熱的影響を受けるようになることがわかる。無次元液滴間隔が12.75の場合でも、気体当量比が低い条件では、隣接する液滴が点火する少し前から火炎の熱的影響を受けていることから、気体当量比の増大によって燃え広がり誘導時間が短くなり、2つ前の液滴の火炎から熱的影響が及ぶ時刻より隣接する液滴の火炎の熱的影響が及ぶ時刻の方が気体当量比0.5以上の条件で早まった結果、図4の正規化点火誘導時間が急激に短くなったと考えられる。モード1については、過去の実験⁴⁾より燃え広がる火炎の先端は、ほぼ一定の速度で進行することがわかっている。そこで、火炎前縁に存在する高温領域も燃え広がる火炎と同じ速度で進行していると仮定する。図7に、一定速度で火炎が燃え広がる条件（無次元液滴間隔 2, 3および3.75）のみ、液滴が火炎から熱的影響を受け始めた時刻における火炎前縁と液滴中心の無次元距離（無次元熱的干渉距離）を示す。無次元熱的干渉距離は、無次元液滴間隔を正規化燃え広がり誘導時間で除し、その値に正規化点火誘導時間をかけた値である。横軸は気体当量比である。気体当量比の増加に伴い無次元熱的干渉相対距離が増大し、より火炎が遠方にある時点から未燃液滴は火炎に加熱されていることがわかる。無次元熱的干渉距離に及ぼす無次元液滴間隔の影響は、明確には現れていないが、無次元液滴間隔が3および3.75の条件に比較して、無次元液滴間隔の狭い2の場合、無次元熱的干渉距離が短い傾向が見て取れる。対象とする液滴と火炎の間の未燃液滴が熱伝達を阻害していると考えられる。

5. 結言

燃料蒸気-空気予混合気中液滴列の火炎燃え広がりにおいて、列中の複数の液滴を拡大撮影し、燃え広がり火炎と液滴の熱的干渉について調べた。無次元液滴間隔は2, 3, 3.75, および12.75とした。気体当量比は、0から0.7の範囲で変化させた。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 全ての無次元液滴間隔において、気体当量比の増大に伴い、液滴の加熱が始まってから点火に至るまでの点火誘導時間が減少した。
- (2) 無次元液滴間隔が12.75、気体当量比が0.5以上の条件を除き、液滴の加熱は隣接する液滴が点火する以前から始まる。

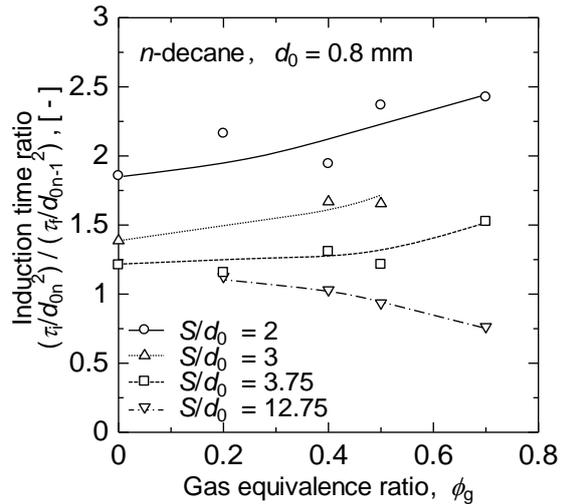


Fig.6 Ratio of ignition induction time to flame spread induction time as a function of gas equivalence.

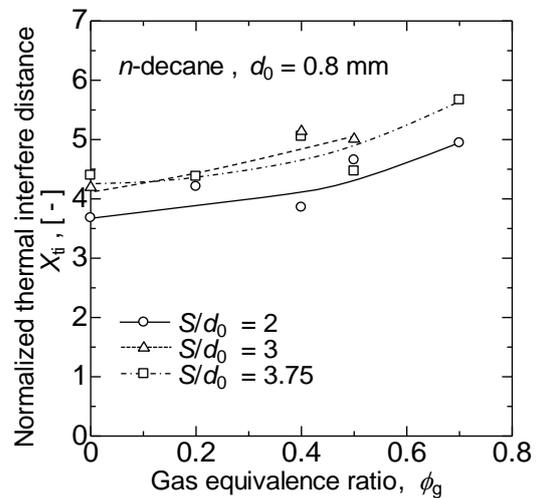


Fig.7 Relationship between thermal interfere distance and gas equivalence.

参考文献

1. 菅沼・他5名, 日本機械学会論文集 (B編), 74 : 212-220 (2008).
2. 高橋・他3名, 第47回燃焼シンポジウム講演論文集, 492-493(2009).
3. 三上・他5名, 日本燃焼学会誌, 45 : 238-247 (2003).
4. 岩崎・他4名, 第46回燃焼シンポジウム講演論文集, 558-559(2008).
5. 梅村, 日本機械学会論文集 (B編), 68 : 2422-2428 (2002).
6. 菊池・他2名, 液滴間火炎伝播メカニズム研究, JAXA-RR-06-038 : 1-19 (2007).
7. 鈴木・他3名, 日本液体微粒化学会誌, 17: 74-80(2008).